西亚副热带西风急流年际变化与三江源区夏季降水的关系

黄小梅[1]， 齐冬梅[1]， 李 笛[1]， 孙 亦[2]， 吕纯月[3]

（1. 中国气象局成都高原气象研究所，高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室，四川 成都 610072；
2. 四川省气象灾害防御技术中心，四川 成都 610072；3. 四川省气象探测数据中心，四川 成都 610072）

摘 要：利用1979—2018年中国地面逐月降水量网格数据集和ERA-interim逐月再分析资料，通过定义夏季西亚副热带西风急流（以下简称西亚急流）位置和强度指数，采用统计和动力诊断方法研究了西亚急流位置和强度年际变化与三江源区夏季降水异常的关系，揭示了急流位置变化对三江源区夏季降水的可能影响机制。结果表明：夏季西亚急流南北位置和强度具有明显的年际和年代际变化特征，急流位置在2000s之前表现为南北振荡变化特征，在2000s及其以后以偏南为主。在年际时间尺度上，西亚急流位置对三江源区夏季降水的影响比急流强度更加明显。当急流位置偏南（北）时，三江源区夏季降水偏多（少）。进一步研究发现，在西亚急流偏南年，三江源区位于高层正高度异常和中层负高度异常控制区，全区存在显著的上升运动异常，有利于高原低值系统活动。配合中低层异常气旋性环流东部的偏南风，有利于将热带海洋的暖湿气流输送到源区，导致降水偏多，反之亦然。

关键词：西亚副热带西风急流；夏季降水；年际变化；三江源区

西风急流是对流层上层的一种持续存在的行星尺度环流系统，对维持全球大气动量、能量的输送及平衡起着不容忽视的作用[1]。夏季副热带西风急流带位置在40°N附近，东北太平洋上空风速减弱将其分为了亚洲急流（0°~150°W）和北美急流（120°W~0°）[2]。亚洲副热带西风急流80°E以西和以东部分分别被称为西亚副热带西风急流（以下简称西亚急流）和东亚副热带西风急流（以下简称东亚急流）[3]。自20世纪50年代以来，许多研究表明东亚急流的位置和强度变化与东亚大气环流季节转换、亚洲夏季风爆发以及东亚梅雨的开始和结束有密切联系[4-11]。值得注意的是，由于6月初副热带西风急流的北跳不仅发生在东亚季风区，也发生在西亚干旱区。杨莲梅等[12-13]研究发现沿西亚急流传播的准静止波活动与新疆夏季降水异常有密切联系。Zhao等[14]进一步研究表明西亚急流的南北位置对新疆夏季降水变化有重要影响，当急流位置偏南时，有利于引导来自低纬度的西南暖湿气流输送到新疆北部从而导致降水偏多。

三江源地区位于青藏高原腹地，是我国最重要两条母亲河长江、黄河以及澜沧江的发源地，一直以来，被誉为“中华水塔”[15]。该区域是我国极其重要的生态屏障，具有高寒生物资源丰富、生态环境脆弱以及对气候变化敏感的特征[16-19]。近些年来，受全球气候变暖和人为活动的影响，三江源区生态环境持续恶化，频发的高原地区干旱、极端干旱事件严重地影响着河流中下游地区水量供给和农业生产。因此，三江源区降水资源变化规律及其异常成因的研究备受关注[20-25]。不少研究指出，大尺度大气环流系统在影响三江源区降水变化方面发挥着重要的作用。例如，李夫星等[26]研究揭示了东亚夏季风强度与黄河流域中东部地区降水具有较好的正相关关系。王可丽等[27]研究表明长江源区年降水偏多与蒙古低压和西风风速减弱有密切联系。唐见等[28]研究发现南亚季风是影响长江源区夏季降水量较为重要的大气环流因子，其可以通过

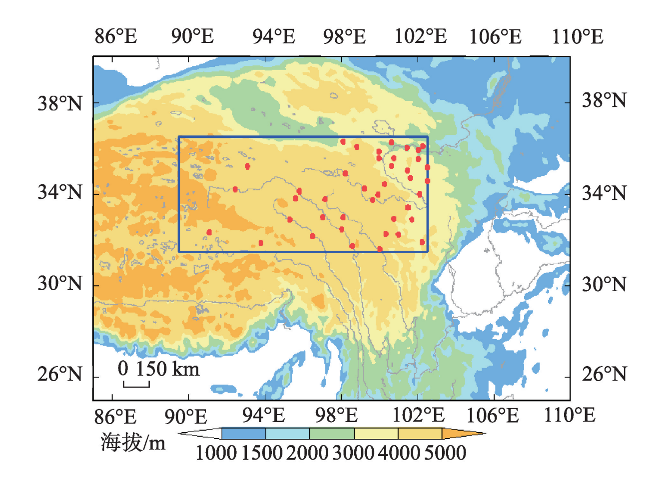
收稿日期：2022-05-31； **修订日期**：2022-06-30
基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究子专题项目（2019QZKK0106）；青海省防灾减灾重点实验室开放基金项目（QFZ-2021-Z05）；国家自然科学基金项目（42075045）；四川省自然科学基金（2022NSFSC0230）
作者简介：黄小梅（1987-），女，副研究员，主要从事青藏高原气候变化研究. E-mail: hxmlovely@163.com
通讯作者：齐冬梅. E-mail: qidongmei1983@163.com

加强西南水汽输送从而引起长江源区降水偏多。

西亚急流作为重要的大尺度大气环流系统之一，与新疆地区夏季降水多寡关系密切。那么，它的变化对青藏高原三江源区夏季降水是否有明显影响呢?若有影响，其作用的物理机制又是什么呢?为了回答上述问题，本文通过研究西亚急流南北位置和强度年际变化与三江源区夏季降水异常的关系，并分析其中的物理过程，揭示大尺度环流因子对三江源区夏季降水变化的驱动机制，以期进一步提高区域旱涝灾害预测水平，为准确预测气候变化背景下三江源区未来水资源状况提供重要参考。

1 研究区概况

三江源区(31°39′~36°12′N，89°45′~102°23′E)位于青海省南部，平均海拔3500 m以上(图1)，流域面积为3.631×10^6 km^2，其中长江源区、黄河源区、澜沧江源区和其他源区的面积分别为15.41×10^4 km^2、10.48×10^4 km^2、3.68×10^4 km^2、6.74×10^4 km^2[29]。行政区域包括玉树、果洛、海南、黄南4个藏族自治州的16个县和格尔木市的唐古拉乡，约占青海省总面积的43%[30]。三江源区年平均气温在-11.8~8.3 ℃，年平均降水量为289.6~745.5 mm，年平均蒸发量为730~1700 mm[29]。属于典型的高原大陆性气候，表现为冷热两季交替、干湿两季分明、年温差小、日湿差大、日照时间长、辐射强烈、无四季区分的特征[29-30]。植被类型有针叶林、阔叶林、针阔混交林、灌丛、草原、草甸等，并以草原和草甸所占面积最大[31]。



注：蓝色方框为研究区域，红色实心圆点表示气象站点。

图1 三江源区地形图

Fig. 1 Topography of the Three River Source region

2 资料和方法

采用的资料主要包括：(1) 1979—2018年ERA-interim再分析数据集[32]提供的水平分辨率为0.75°×0.75°的月平均纬向风、经向风、垂直速度、比湿、位势高度场等再分析资料。(2) 针对三江源地区夏季(6—8月)降水，本文选取国家气象信息中心提供的中国地面逐月网格(0.5°×0.5°的分辨率，或称CN05)数据集V 2.0(1979—2018年)，该资料是中国2416个台站的降水观测资料的客观分析结果[33]，以及GPCP月平均降水数据[34]。文中的气候平均值采用1981—2010年的平均值。

利用经验正交函数分解(EOF)[35-36]得到西亚急流位置和强度指数，一元线性回归分析法[37]研究西亚急流位置年际变化对三江源区夏季降水影响的可能物理机制。为了聚焦年际变化的研究，文中的变量在进行相关和回归计算之前均采用了9点高斯滤波方法去除了变量的年代际变化趋势。采用t检验进行统计显著性检验。

3 结果与分析

3.1 夏季西亚急流位置和强度的定义及变化特征

采用ERA-interim再分析资料得到的夏季气候平均200 hPa纬向风分布(图2)，由图2可见，夏季副热带西风急流位置在40°N附近，亚洲急流存在3个中心，分别位于50°E附近的里海上空、80°~100°E的中国西部地区和140°~160°E的日本及其以东地区。这与研究学者采用NCEP/NCAR再分析资料得出的结果[3,14]基本一致。

这里根据Zhao等[14]对夏季西亚急流位置和强度的计算方法，采用1979—2018年的ERA-interim再分析资料对(25°~55°N，40°~80°E)区域范围的

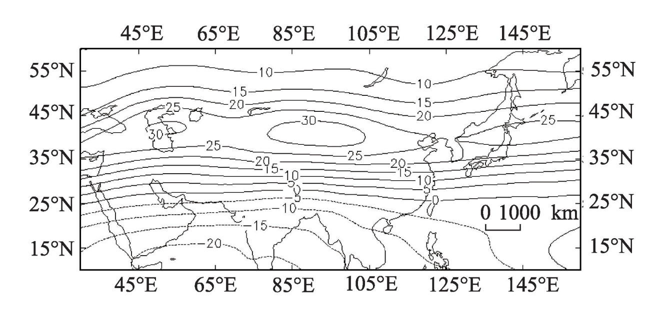


图2 气候平均夏季200 hPa纬向风场

Fig. 2 The climatological summer 200 hPa zonal wind field

200 hPa纬向风异常场进行正交经验函数(EOF)分解,得出体现西亚急流异常变化的两个主模态。前两个EOF模态解释方差分别为45.9%和20.3%,累积方差贡献达到66.2%,表明前两个模态可以体现该区域200 hPa纬向风异常的主要特征。EOF分解第一模态在空间场上表现为从低纬到高纬的南北反相分布特征,零线位于40°N附近(图3a)。由于气候态的夏季副热带西风急流轴线也位于40°N附近,因此这种沿西亚急流轴线南北两侧的西风异常指示了急流轴线的经向移动,这里将第一模态相应的时间系数PC1定义为西亚急流的位置指数。从时间系数PC1的变化可以发现西亚急流南北位置存在明显的年际和年代际变化特征,在2000s之前急流表现为南北振荡变化特征,在2000s及其以后以偏南为主(图3b)。EOF分解第二模态空间场上表现为在里海以东附近为大值中心(图3c),大值中心与夏季西亚急流气候平均位置基本一致,因此第二模态相应的时间系数PC2可以体现急流强度的变化,这里将PC2定义为西亚急流的强度指数。PC2随时间的变化表明西亚急流强度除包含明显的年际变化外,还在2000s中期之后表现出明显的年代际减弱趋势(图3d)。

3.2 西亚急流位置和强度年际变化与三江源区夏季降水的关系

为了分析西亚急流位置和强度年际变化与三江源区夏季降水异常之间的关系,计算了去掉年代际变化后的1979—2018年夏季西亚急流位置和强度指数与同期三江源区降水的相关系数场(图4),可见,西亚急流位置指数与三江源区夏季降水在大部分地区都呈显著的正相关,高相关区主要位于长江源区,中心相关系数超过0.5,通过了95%信度的显著性检验(图4a)。说明夏季西亚急流位置偏南(北)容易造成同期三江源区降水偏多(少),且在长江源区表现最为明显。西亚急流强度指数与三江源区夏季降水的相关并不显著(图4b),表明,在年际时间尺度上,西亚急流南北位置对三江源区夏季降水的影响比急流强度更加明显。

为了进一步论证西亚急流位置年际变化与三

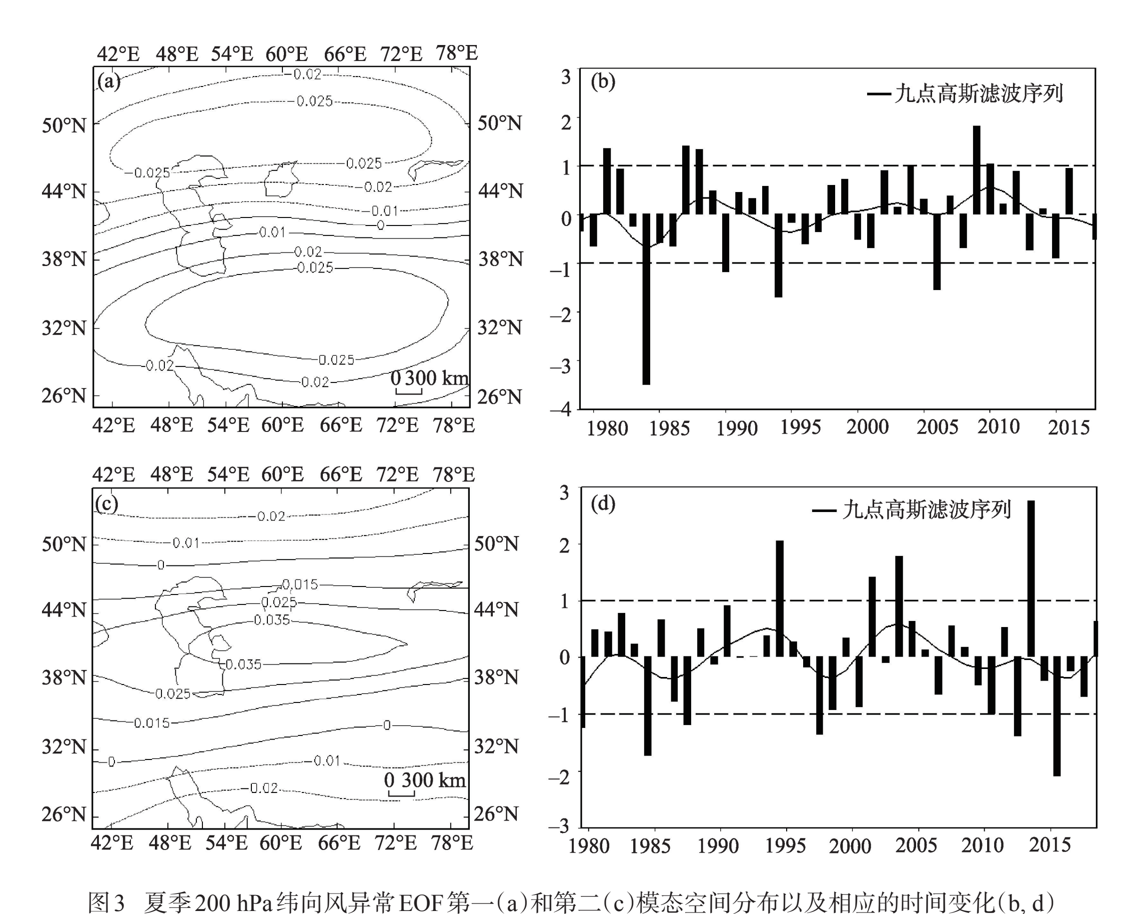
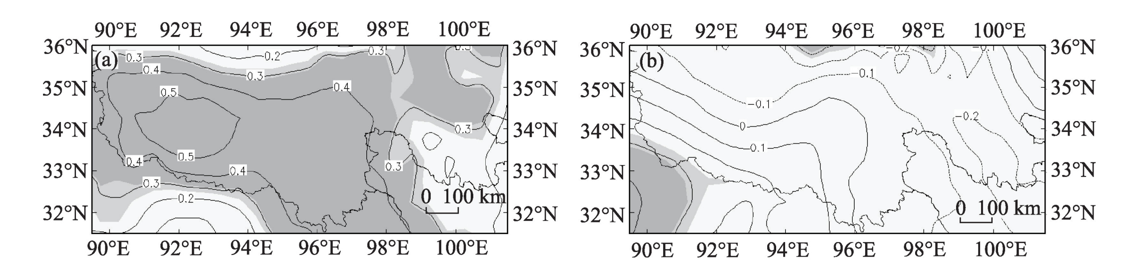


图3　夏季200 hPa纬向风异常EOF第一(a)和第二(c)模态空间分布以及相应的时间变化(b, d)

Fig. 3　Spatial pattern for the first (a) and second (c) EOF mode of summer zonal wind anomaly at 200 hPa and corresponding principal component(b, d)



注:深、浅阴影分别表示通过95%、90%显著性水平检验。

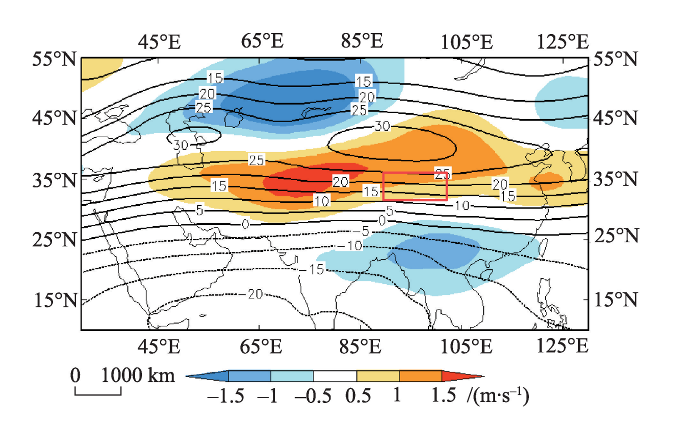
图4 西亚急流位置(a)和强度(b)指数与同期三江源区降水量的相关系数场

Fig. 4 Simultaneous correlation of the detrended West Asian Jet position (a) and strength (b) index with the detrended precipitation over the Three River Source region

江源区夏季降水的关系,计算了1979—2018年(31.5°~36.5°N,89.5°~102.5°E)区域平均的夏季降水量,并将其定义为三江源区夏季降水指数。图5给出了去掉年代际变化的夏季降水指数回归的同期200 hPa纬向风场,结果发现,在(42°~52°N,48°~88°E)区域为明显的纬向风负异常区,而(30°~40°N,50°~110°E)为明显的纬向风正异常区。表明当三江源区夏季降水偏多时,对应同期西亚急流南侧加强,北侧减弱,急流中心位置明显偏南,反之亦然。由此可知,夏季西亚急流南北位置年际变化与三江源区降水多寡有密切联系。

3.3 西亚急流位置年际变化对三江源区夏季降水的影响机制

图6给出了夏季西亚急流位置指数去掉年代际变化后回归的同期100 hPa和500 hPa位势高度场。由图6可见,在西亚急流位置偏南年,100 hPa



注:红色方框为研究区域。

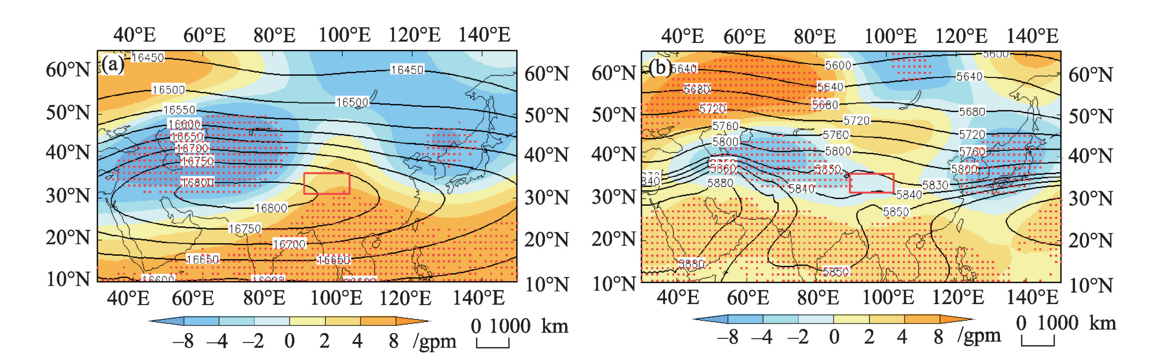
图5 气候平均夏季200 hPa纬向风场和降水指数回归的200 hPa纬向风场

Fig. 5 The climatological summer 200 hPa zonal wind field and pattern of regression of 200 hPa zonal wind against the detrended precipitation index

负高度异常中心位于里海至巴尔喀什湖和东北亚地区,正高度异常位于青藏高原东部及其以南的低纬度地区(图6a),表明南亚高压位置明显偏东偏南。500 hPa位势高度异常场上(图6b),乌拉尔山附近为显著的正高度异常区,里海以东至青藏高原中部和日本海附近为显著的负高度异常区,表明中高纬地区乌拉尔山阻塞高压加强,有利于北方冷空气南下。中纬度沿里海自西向东存在"-+-"位势高度异常分布,表明中纬度西风急流上Rossby波活跃。低纬度自阿拉伯半岛经印度半岛至西北太平洋均为显著的正高度异常,表明印度季风低压偏弱,西太平洋副热带高压偏西偏强,有利于来自热带海洋的水汽向北输送至高原东部。三江源区位于里海以东至青藏高原的负高度异常区东部,位势高度明显偏低,这种异常环流形势有利于高原低涡、高原切变线等低值系统的活动,从而造成区域夏季降水偏多。在西亚急流位置偏北年,则情况相反。

从夏季西亚急流位置指数去掉年代际变化后回归的同期500 hPa风场和GPCP降水场(图7a)可以发现,在西亚急流位置偏南年,对流层中层中纬度地区自西向东存在两个强大的异常气旋性环流系统,一个位于里海至青藏高原东部,另一个位于朝鲜半岛至日本以东地区,三江源区位于里海至青藏高原东部异常气旋性环流的东部,上空存在明显的异常偏南风,有利于来自低纬的暖湿气流输入,导致区域降水偏多。而当急流位置偏北时,则情况相反。

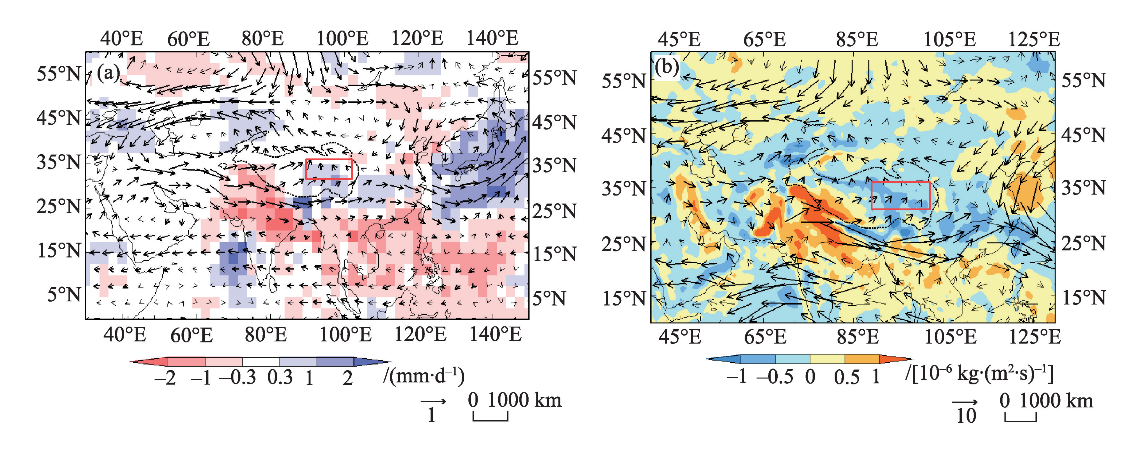
为了反映急流南北位置变化对应的水汽输送异常分布情况,这里进一步计算了夏季西亚急流位置指数去掉年代际变化后回归的同期整层积分水



注:等值线代表气候态分布,图a、图b中红色点表示通过90%显著性检验。

图6　西亚急流位置指数回归的同期100 hPa(a)和500 hPa(b)位势高度场

Fig. 6　Patterns of regressions of 100 hPa (a), and 500 hPa (b) geopotential height against the detrended West Asian Jet position index



注:图a中阴影表示通过90%显著性检验的降水异常,图a、图b中粗箭头表示通过90%显著性检验的经向或纬向分量,黑虚线表示3000 m地形等高线。

图7　西亚急流位置指数回归的同期500 hPa风场及GPCP降水场(a)和整层积分水汽通量及其散度场(b)

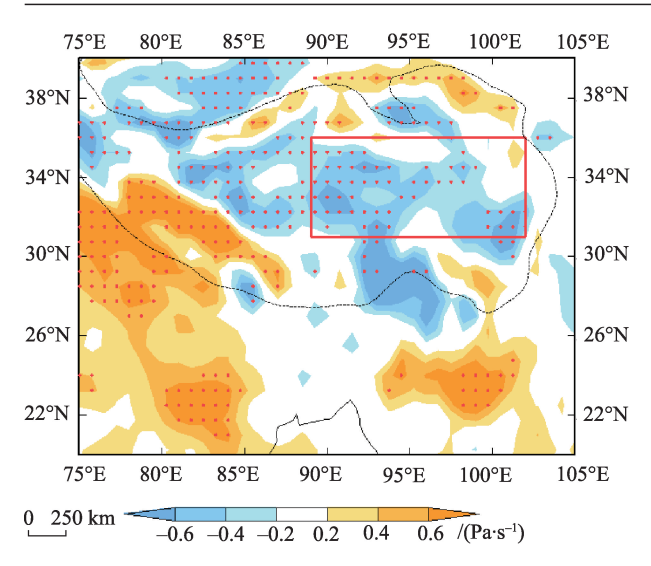
Fig. 7　Patterns of regressions of (a) 500 hPa wind and GPCP precipitation, (b) vertically integrated water vapor flux and its divergence against the detrended West Asian Jet position index

汽输送通量及其散度场(图7b)。由图7b可见,在急流位置偏南年,整层积分水汽输送通量异常与500 hPa风场异常形势对应较好,从里海至青藏高原地区和东北亚地区均为明显的异常气旋性环流,低纬印度半岛北部经中南半岛至我国南海地区为强大的异常反气旋性环流,这个反气旋性环流异常有助于将低纬度热带海洋的水汽不断输送到高原地区。三江源区位于里海至青藏高原的异常气旋性环流东部,整层积分水汽通量异常辐合,有利于产生降水。当急流位置偏北年,则情况相反。

众所周知,较强的上升运动和充沛的水汽来源是降水产生的两个必要条件。下面进一步分析了夏季西亚急流南北位置年际变化对应的垂直速度异常情况,从西亚急流位置指数去掉年代际变化后回归的500 hPa垂直速度场(图8)可以发现,在急流位置偏南年,对流层中层青藏高原中部大部分地区存在明显的上升运动异常,仅在边缘的小部分区域为下沉运动异常。三江源全区基本为显著的上升运动异常,这种大尺度的垂直上升运动异常可以促进水汽抬升凝结过程,有利于降水的产生。而在急流位置偏北年,则情况相反。

4　结 论

利用ERA-interim逐月再分析资料和中国地面逐月降水量网格数据集,在分析夏季西亚急流位置和强度年际和年代际变化特征的基础上,研究了急流南北位置年际变化对三江源区夏季降水的影响



注:红色点表示通过90%显著性检验,垂直速度已放大100倍。

图8 西亚急流位置指数回归的同期500 hPa垂直速度场

Fig. 8 Patterns of regressions of 500 hPa vertical velocity against the detrended West Asian Jet position index

及其物理机制,得到以下主要结论:

(1) 1979—2018年夏季西亚急流位置和强度均具有明显的年际和年代际变化特征。急流位置在2000s之前表现为南北振荡变化特征,在2000s及其以后以偏南为主。急流强度在2000s中期之后表现出明显的年代际减弱趋势。

(2) 在年际时间尺度上,西亚急流南北位置对三江源区夏季降水的影响比急流强度更加明显。西亚急流位置与三江源区夏季降水存在显著的正相关关系,当急流位置偏南(北)时,三江源区夏季降水偏多(少)。

(3) 在西亚急流位置偏南年,高层南亚高压位置明显偏东偏南,三江源区位于南亚高压东部的正高度异常和中层里海以东至青藏高原的负高度异常控制区,全区存在显著的上升运动异常,有利于高原低值系统活动。对流层中低层里海至青藏高原为异常气旋性环流,三江源区位于该异常气旋性环流东部,上空存在明显的偏南风异常,整层积分水汽通量异常辐合,有利于来自热带海洋的暖湿气流输入,导致降水偏多,反之偏少。

本文主要分析了夏季西亚急流位置和强度的年际变化特征及其与同期三江源区降水异常的关系,重点讨论了急流南北位置年际变化影响三江源区夏季降水的可能机理,可为提高区域旱涝灾害预测水平提供理论依据。但是,由于影响三江源区夏季降水变化的因素很多,比如南亚季风、高原季风和高原热力作用等,仅从西风急流的角度来探讨三江源区夏季降水的变化和成因是不够的,未来还需要结合其他影响因子进行综合研究。

参考文献(References):

[1] Cressman G P. Circulations of the west Pacific jet stream[J]. Monthly Weather Review, 2009, 109(12): 2450−2463.

[2] 字冉, 孔震, 张启悦, 等. 亚洲西风急流纬向非均匀性变化成因及其对东亚夏季气候的影响[J]. 大气科学, 2020, 44(5): 1109−1124. [Zi Ran, Kong Zhen, Zhang Qiyue, et al. The causes of variation in the zonal asymmetry of the Asian westerly jet and its impacts on East Asian climate in boreal summer[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(5): 1109−1124.]

[3] 杨莲梅, 张庆云. 夏季亚洲副热带西风急流气候特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 10−20. [Yang Lianmei, Zhang Qingyun. Climate features of summer Asia subtropical westerly jet stream[J]. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(1): 10−20.]

[4] 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 在六月和十月大气环流的突变现象[J]. 气象学报, 1958, 29(4): 249−263. [Ye Duzheng, Tao Shiyan, Li Maicun. The abrupt change of circulation over northern Hemisphere during June and October[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1958, 29(4): 249−263.]

[5] 陶诗言, 陈隆勋. 夏季亚洲大陆上空大气环流的结构[J]. 气象学报, 1957, 28(3): 234−247. [Tao Shiyan, Chen Longxun. The structure of general circulation over continent of Asia in summer[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1957, 28(3): 233−247.]

[6] 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系[J]. 气象学报, 1958, 29(2): 119−134. [Tao Shiyan, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. The relationship between May-Yu in Far East and the behaviour of circulation over Asia[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1958, 29(2): 119−134.]

[7] 李崇银, 王作台, 林士哲, 等. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 641−658. [Li Chongyin, Wang Zuotai, Lin Shizhe, et al. The relationship between East Asian summer monsoon activity and northward jump of the upper westerly jet location[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(5): 641−658.]

[8] Zhang Y C, Kuang X Y, Guo W D, et al. Seasonal evolution of the upper-tropospheric westerly jet core over East Asia[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(11): 317−324.

[9] Sampe T, Xie S P. Large-scale dynamics of the Meiyu-Baiu rainband: Environmental forcing by the westerly jet[J]. Journal of Climate, 2010, 23(1): 113.

[10] 秦育婧, 卢楚翰. 冬季欧亚大陆反气旋活动特征及其与中国气温的关系[J]. 大气科学学报, 2017, 40(3): 418−424. [Qin Yujing, Lu Chuhan. Characteristics of the anticyclone over Eurasia and its relationship with the winter temperature in China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2017, 40(3): 418−424.]

[11] 姬凯, 王士新, 左洪超, 等. 东亚副热带急流经向位置对中国西北东部盛夏降水的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 10−17. [Ji Kai, Wang Shixin, Zuo Hongchao, et al. Effect of meridional position of East Asian subtropical jet on midsummer precipitation in eastern part of Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 10−17.]

[12] 杨莲梅, 张庆云. 新疆夏季降水年际变化与亚洲副热带西风急流[J]. 应用气象学报, 2008, 19(2): 171−179. [Yang Lianmei, Zhang Qingyun. Interannual variation of summer precipitation in Xinjiang and Asian subtropical westerly jet stream[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(2): 171−179.]

[13] 杨莲梅, 张庆云. 夏季沿西亚急流Rossby波活动异常的波源和能量传播及转换特征[J]. 气象学报, 2008, 66(4): 555−565. [Yang Lianmei, Zhang Qingyun. Wave sources, energy propagation and conversion for anomalous Rossby wave activities along West Asian jet stream[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(4): 555−565.]

[14] Zhao Y, Wang M Z, Huang A N, et al. Relationships between the West Asian subtropical westerly jet and summer precipitation in northern Xinjiang[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 116(3−4): 403−411.

[15] 游庆龙, 康世昌, 李潮流, 等. 三江源地区1961—2005年气温极端事件变化[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 232−236. [You Qinglong, Kang Shichang, Li Chaoliu, et al. Change in extreme temperature over Sanjiangyuan region in the period from 1961−2005[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(2): 232−236.]

[16] 孟宪红, 陈昊, 李照国, 等. 三江源区气候变化及其环境影响研究综述[J]. 高原气象, 2020, 39(6): 1133−1143. [Meng Xianhong, Chen Hao, Li Zhaoguo, et al. Review of climate change and its environmental influence on the Three-River regions[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(6): 1133−1143.]

[17] Jiang C, Zhang L B. Effect of ecological restoration and climate change on ecosystems: A case study in the Three-Rivers Headwater Region, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(6): 382.

[18] 赵之重, 赵凯, 徐剑波, 等. 三江源地表反照率时空变化及其与气候因子的关系[J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1032−1038. [Zhao Zhizhong, Zhao Kai, Xu Jianbo, et al. Spatial-temporal changes of surface albedo and its relationship with climate factors in the source of Three Rivers Region[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(6): 1032−1038.]

[19] 靳铮, 游庆龙, 吴芳营, 等. 青藏高原三江源地区近60 a气候与极端气候变化特征分析[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1042−1055. [Jin Zheng, You Qinglong, Wu Fangying, et al. Changes of climate and climate extremes in the Three-Rivers Headwaters' Region over the Tibetan Plateau during the past 60 years[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 1042−1055.]

[20] 刘彩红, 王朋岭, 温婷婷, 等. 1960—2019年黄河源区气候变化时空规律研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 293−302. [Liu Caihong, Wang Pengling, Wen Tingting, et al. Spatio-temporal characteristics of climate change in the Yellow River source area from 1960 to 2019[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 293−302.]

[21] Shi H Y, Li T J, Wei J H, et al. Spatial and temporal characteristics of precipitation over the Three-River Headwaters region during 1961−2014[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2016, 6: 52−65.

[22] 祁艳, 颜玉倩, 李金海, 等. 青藏高原5—10月地表潜热通量与青海同期降水之间的关系[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 529−536. [Qi Yan, Yan Yuqian, Li Jinhai, et al. Relationship between surface latent heat flux over the Qinghai Tibetan Plateau and precipitation in Qinghai from May to October[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 529−536.]

[23] 齐冬梅, 张顺谦, 李跃清. 长江源区气候及水资源变化特征研究进展[J]. 高原山地气象研究, 2013, 33(4): 89−96. [Qi Dongmei, Zhang Shunqian, Li Yueqing. Research progress on variations of the climate and water resources in the Source region of the Yangtze River[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2013, 33(4): 89−96.]

[24] 张宇, 李铁键, 李家叶, 等. 西风带和南亚季风对三江源雨季水汽输送及降水的影响[J]. 水科学进展, 2019, 30(3): 348−358. [Zhang Yu, Li Tiejian, Li Jiaye, et al. Influence of the westerlies and the South Asia monsoon on water vapor transport and precipitation in the Three-River Headwaters Region during the rainy season[J]. Advance in Water Science, 2019, 30(3): 348−358.]

[25] 保广裕, 乜虹, 戴升, 等. 黄河上游河源区不同量级降水对径流变化的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 704−713. [Bao Guangyu, Nie Hong, Dai Sheng, et al. Research on effects of different precipitation magnitudes on runoff changes in the headwater region of the upper Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 704−713.]

[26] 李夫星, 陈东, 汤秋鸿. 黄河流域水文气象要素变化及与东亚夏季风的关系[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 481−490. [Li Fuxing, Chen Dong, Tang Qiuhong. Variations of hydro-meteorological variables in the Yellow River basin and their relationships with the East Asian summer monsoon[J]. Advance in Water Science, 2015, 26(4): 481−490.]

[27] 王可丽, 程国栋, 丁永建, 等. 黄河, 长江源区降水变化的水汽输送和环流特征[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 8−14. [Wang Keli, Cheng Guodong, Ding Yongjian, et al. Characteristics of water vapor transport and atmospheric circulation for precipitation over the source regions of the Yellow and Yangtze Rivers[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(1): 8−14.]

[28] 唐见, 曹慧群, 陈进. 长江源区水文气象要素变化及其与大尺度环流因子关系研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 840−852. [Tang Jian, Cao Huiqun, Chen Jin. Changes of Hydro-meteorological factors and the relationships with large-scale circulation factors in the source region of Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 840−852.]

[29] 强安丰, 魏加华, 解宏伟. 青海三江源地区气温与降水变化趋势

分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(2): 10−14. [Qiang Anfeng, Wei Jiahua, Xie Hongwei. Trend analysis of temperature and precipitation in Sanjiangyuan region of Qinghai Province[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(2): 10−14.]

[30] 丁生祥, 郭连云. 三江源区近50 a降水量变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 310−315. [Ding Shengxiang, Guo Lianyun. Analysis of precipitation variation characteristics in Three-River Headwaters region of China in recent 50 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(4): 310−315.]

[31] 蒋冲, 李芬, 高艳妮, 等. 1956—2012年三江源区河流流量变化及成因[J]. 环境科学研究, 2017, 30(1): 30−39. [Jiang Chong, Li Fen, Gao Yanni, et al. Streamflow variation in the Three-River Headwaters region during 1956−2012[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(1): 30−39.]

[32] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553−597.

[33] 孙亦, 巩远发. 印度夏季风影响下的青藏高原降水及环流异常变化特征[J]. 成都信息工程大学学报, 2019, 34(4): 411−419. [Sun Yi, Gong Yuanfa. Characteristics of abnormal changes of precipitation over the Tibetan Plateau and atmospheric circulation under the influence of Indian summer monsoon[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2019, 34(4): 411−419.]

[34] Adler R F, Huffman G, Chang A, et al. The version 2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979−present) [J]. Journal of Hydrometeorology, 2003, 4: 1147−1167.

[35] 邓爱军, 陶诗言, 陈烈庭. 我国汛期降水的EOF分析[J]. 大气科学, 1989, 13(3): 289−295. [Deng Aijun, Tao Shiyan, Chen Lieting. The EOF analysis of rainfall in China during monsoon season[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1989, 13(3): 289−295.]

[36] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 37−55. [Wei Fengying. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 37−55.]

[37] 王春学, 马振峰, 邵鹏程, 等. 我国华西秋雨的气候变化规律及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1113−1121. [Wang Chunxue, Ma Zhenfeng, Shao Pengcheng, et al. Climate variation of Huaxi autumn rain and the impact factors influencing it[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1113−1121.]

Annual relationship between the West Asian subtropical westerly jet and summer precipitation over the Three River Source region

HUANG Xiaomei[1], QI Dongmei[1], LI Di[1], SUN Yi[2], LYU Chunyue[3]

(1. Chengdu Institute of Plateau Meteorology, CMA, Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, Sichuan, China; 2. Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Sichuan Province, Chengdu 610072, Sichuan, China; 3. Sichuan Meteorological Observation and Data Centre, Chengdu 610072, Sichuan, China)

Abstract: Based on the monthly gridded precipitation in China and monthly ERA-interim reanalysis dataset from 1979 to 2018, the annual relationship between the position and intensity of West Asian subtropical westerly jet (WASWJ) and summer precipitation over the Three River Source (TRS) region and their corresponding physical mechanism are discussed. The results show that the position and intensity of WASWJ have evident interannual and interdecadal variability. The position of WASWJ is characterized by north-south oscillation before 2000s and dominated by southerlies during and after 2000s. On the interannual time scale, the position of WASWJ is more important than its strength in influencing summer precipitation over the TRS region. When the WASWJ locates at latitudes more southern than normal (more northern than normal), the summer precipitation over the TRS is higher (less). Further analysis shows that when the WASWJ moves southward, the anomalous upper-level positive and middle-level negative geopotential height and significant ascending movement over the TRS region favor the development of the plateau low-value system. The combination of the anomalous southerly flow in the east of anomalous cyclonic circulation at the middle to lower troposphere, which is beneficial for the warm and humid air flow from tropical ocean to the TRS region, increases precipitation and vice versa.

Keywords: West Asian subtropical westerly jet; summer precipitation; annual variation; Three River Source region